

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Podzemní zásobníky plynu

Underground Gas Storage

Student:

Adriana Sikorová

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

Ostrava 2018

## Zadání bakalářské práce

Student: **Adriana Sikorová**  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika  
Téma: Podzemní zásobníky plynu  
Underground Gas Storage  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rešerše skladování plynu v ČR
3. Rešerše skladování plynu ve světě
4. Podmínky pro uložení plynu do podzemí
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Klepsatel, F. a kol. *Městské podzemní stavby*. Bratislava: Jaga Group, 2005, 286 s. ISBN: 80-8076-021-7  
Klepsatel, F. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 80-889-0543-5  
BUJOK, Petr, Richard BITTNER a Otakar DORDA. *Těžba a vtláčování tekutin: (vybrané kapitoly)*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1994.  
Odborné články (Scopus) a firemní časopisy např.: Underground gas storage in Austria - OMV Group apod.  
<http://oenergetice.cz>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2017

Datum odevzdání: 04.05.2018

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 4. 5. 2018

*Sikarová Adéla*  
.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- byla jsem seznámena s tím, že na mojí bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 4. 5. 2018

  
Podpis studenta

## **Anotace**

Tato bakalářská práce je přehledem jak se skladuje plyn a jaké jsou druhy podzemních zásobníků. Součástí je stručný přehled podzemních zásobníků v České republice. S podrobnějším popisem podzemního zásobníku v Hájích u Příbrami, který je zatím jediným fungujícím zásobníkem svého druhu na území České republiky. Přibližuje způsoby skladování plynu ve světě, například v solných kavernách v Německu anebo ve skalních kavernách v Norsku. Pro ukázkou je v této práci představen i projekt kavernového zásobníku v Indii, který je využit ke skladování ropy a uzavřen je betonovou zátkou. Technologie betonových zátek se také využívá pro uzavření úložišť jaderného odpadu.

Klíčová slova: plyn, podzemní zásobníky, kaverny, betonová zátky, vodní tlaková clona

## **Annotation**

This bachelor thesis is an overview of how the gas is stored and what are the types of underground reservoirs. Part of this is a brief overview of underground reservoirs in the Czech Republic. With a more detailed description of the underground reservoir in Háje near Příbram, which is the only functioning reservoir of its kind in the Czech Republic. It's about ways to store gas around the world, for example in salt caverns in Germany or in rock caverns in Norway.. For example, a project of a cavernous reservoir in India, which is used for oil storage and is closed by a concrete plug, is presented in this work. The technology of concrete plugs is also used to close the nuclear waste repositories.

Keywords: gas, underground reservoirs, caverns, concrete plugs, water curtains

## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Základní legislativa .....	9
3. Rozdělení podzemních zásobníků .....	11
3.1 Porézní zásobníky .....	11
3.2 Kavernové zásobníky .....	13
3.2.1 Solné kaverny .....	14
3.2.2 Skalní kaverny .....	15
4. Skladování zemního plynu na území ČR .....	16
4.1 Plynový zásobník Háje u Příbrami .....	17
4.1.1 Vytvoření skladovacích prostor .....	18
4.1.2 Konstrukce tlakových uzávěr .....	19
4.1.3 Zpevnění okolí horninového masivu betonové zátky .....	20
4.1.4 Vodní tlaková clona .....	22
4.1.5 Kontrolní monitoring .....	22
5. Skladování plynu v Německu .....	23
5.1 Geologické podmínky v Německu .....	25
5.2 Typy podzemních zásobníků v Německu .....	25
5.3 Solné kaverny Etzel .....	25
5.3.1 Historie vzniku .....	26
5.3.2 Vytváření solných kaveren – technologie vrtání .....	26
5.3.3 Postup při vrtání .....	27
5.3.4 Proces vylouhování kaverny .....	28
6. Skladování plynu v Norsku .....	29
6.1 Geologické podmínky Norska .....	29
6.2 Typy podzemních zásobníků .....	30
6.3 Oblast Mongstad .....	30

6.3.1 Projekt Vestprosess .....	30
6.3.2 Provedení projektu .....	31
6.3.3 Podpora horninového masivu.....	31
6.3.4 Vodní clona .....	32
6.3.5 Chlazení kaverny.....	32
6.3.6 Injektáž .....	34
6.3.7 Šachty .....	34
6.3.8 Betonová zátka .....	36
7. Podzemní zásobník v Indii .....	37
7.1 Druhy podzemních zásobníků v Indii .....	37
7.2 Projekt Padur .....	37
7.2.1 Geologické podmínky .....	38
7.2.2 Proces výstavby.....	39
7.2.3 Vyztužení okolní horniny.....	39
7.2.4 Vodní tlaková clona .....	39
7.2.5 Monitoring.....	39
7.2.6 Konstrukce tunelové zátky a šachtové zátky.....	40
8. Podzemní zásobník ve Finsku .....	42
8.1 Popis projektu.....	42
8.2 Betonová zátka .....	42
9. Závěr.....	44
Seznam použité literatury .....	45
Seznam obrázků .....	47
Seznam tabulek .....	48

# 1. Úvod

Energetika vyžaduje stabilní podnikatelské prostředí. Energetický sektor se vyznačuje potřebou realizace finančně náročných investic s odpovídající dobou životnosti a návratnosti. Energetický sektor je vzhledem ke svému zásadnímu významu pro zajištění základních společenských potřeb předmětem zvýšeného zájmu ze strany státu, který vymezuje podmínky fungování energetických trhů a zásahy státu jsou v tomto kontextu zcela logické a obhajitelné. Legislativní zásahy v oblasti energetiky by měly být – přiměřené, odpovědné, realizované v nezbytně nutném rozsahu, podloženy analýzou dopadů na dotčené subjekty. [17] [18]

Energie je pro náš současný život naprosto nezbytná. Většina jejich zdrojů však přináší ekologické a další problémy. U ropy a uhlí hrozí brzké vytěžení ložisek, elektřinu zase není možné skladovat a odpad jaderných elektráren je nutné ekologicky uskladnit. Zemní plyn, je ale takovým zdrojem energie, který většinou podobných ekologických problémů nemá. Perspektivy těžby jsou dlouhodobé, doprava a skladování nepředstavují žádný problém. A přitom neslouží zdaleka jen na svícení, ale také na výrobu tepla i chladu nebo elektrické energie či slouží jako palivo. [17] [18]

Podzemní zásobníky jsou využívány ke skladování ropy, zemního plynu či jiných druhů plynu, ale i například ke skladování jaderného odpadu. V posledních letech se využití podzemí pro skladování jeví jako velmi výhodné. Čím dál tím častěji se také podzemní prostory využívají i k výstavbě budov pro komerční využití, například sportovní haly, apod. [17] [18]

Zemní plyn je velice ceněná chemická surovina a velmi významný zdroj energie. Česká republika je v spotřebě zemního plynu téměř úplně závislá na dovozu ze zahraničí. Zemní plyn je do ČR přiváděn z Ruska a Norska pomocí tranzitních plynovodů. Avšak odběr zemního plynu z plynárenských sítí je nerovnoměrný. A proto je potřeba tyto výkyvy ve spotřebě nějakým způsobem vyrovnávat, protože těžba a doprava zemního plynu je hospodárná a efektivní, je-li odběr ze sítí rovnoměrný. [17] [18]

K uskladnění přebytků zemního plynu lze využít mnoho různých způsobů. Avšak nejčastějším způsobem je skladování zemního plynu v plynné formě. V plynné formě jej můžeme skladovat pomocí klasických plynojemů, nebo v podzemních zásobnících v porézní hornině anebo v kavernových podzemních zásobnících. [17] [18]



## 2. Základní legislativa

Provozování podzemního uskladňování zemního plynu je podle hornického zákona a báňských předpisů hornickou činností, dle terminologie jde o zvláštní zásahy do zemské kůry. [9]

Základní legislativou pro provozování podzemních zásobníků plynu je zejména:

- Zákon č. 44/1988 Sb. (horní zákon)
- Zákon č. 61/1988 Sb. (o hornické činnosti, výbušninách a o státní báňské správě, tzv. „báňský zákon“)
- Zákon č. 62/1988 Sb. (o geologických pracích)
- Zákon č. 458/2000 Sb. (energetický zákon)
- Zákon č. 133/1985 Sb. (o požární ochraně)
- Prováděcí předpisy k výše uvedeným zákonům

Podmínky pro provádění hornické činnosti – podzemní uskladňování plynu [9]

- Ustanovení MŽP dle HZ a dle vyhlášky MŽP č. 364/1992 Sb. (právní ochrana PZP)
- Získání oprávnění k provádění hornické činnosti dle § 2 písm. f) zákona č. 61/1988 Sb.
- Udělením licence k uskladňování dle §4 energetického zákona č. 458/2000 Sb. (pozn.: udělení licencí je podmíněné autorizovanou osobou provozovatele)
- Kolaudace všech povrchových staveb dle stavebního zákona

Další legislativa využívaná provozovateli podzemních zásobníků plynu při přípravě havarijní a krizové dokumentace:

- Zákon č. 239/2000 Sb. (o integrovaném záchranném systému)
- Zákon č. 240/2000 Sb. (o krizovém řízení)
- Zákon č. 241/2000 Sb. (o hospodářských opatřeních pro krizové stavy)

- Zákon č. 59/2006 Sb. (o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými přípravky)

Provozovatelé při přípravě havarijní a krizové dokumentace dobrovolně přijímají vybrané požadavky legislativy, které pro ně nejsou právně závazná. Provozy podzemních zásobníků plynu v české republice nejsou určeny jako prvek evropské a národní kritické infrastruktury. Určujícím orgánem prvků kritické infrastruktury je pro sektor energetiky ministerstvo průmyslu a obchodu. [9]

### 3. Rozdělení podzemních zásobníků

Podzemní zásobníky lze rozdělit podle způsobu jejich využívání do dvou skupin:

- Sezonní zásobníky
- Špičkové zásobníky

Dále podzemní zásobníky rozdělujeme podle typu:

- Porézní zásobníky
- Kavernové zásobníky

Sezonní zásobníky – jsou zásobníky, které se v průběhu léta plní a ze kterých je v zimním období plyn dodáván do sítě. Tyto zásobníky mají velkou uskladňovací kapacitu, ale menší denní výkon. Pro výstavbu těchto zásobníků se využívají hlavně vytěžená plynová nebo ropná ložiska, výjimečně i tzv. aquifery. V obou případech se jedná o podzemní porézní horninové vrstvy s dostatečnou propustností, v prvním případě byly tyto vrstvy původně zaplněny plynem nebo ropou, v druhém případě vodou. [22]

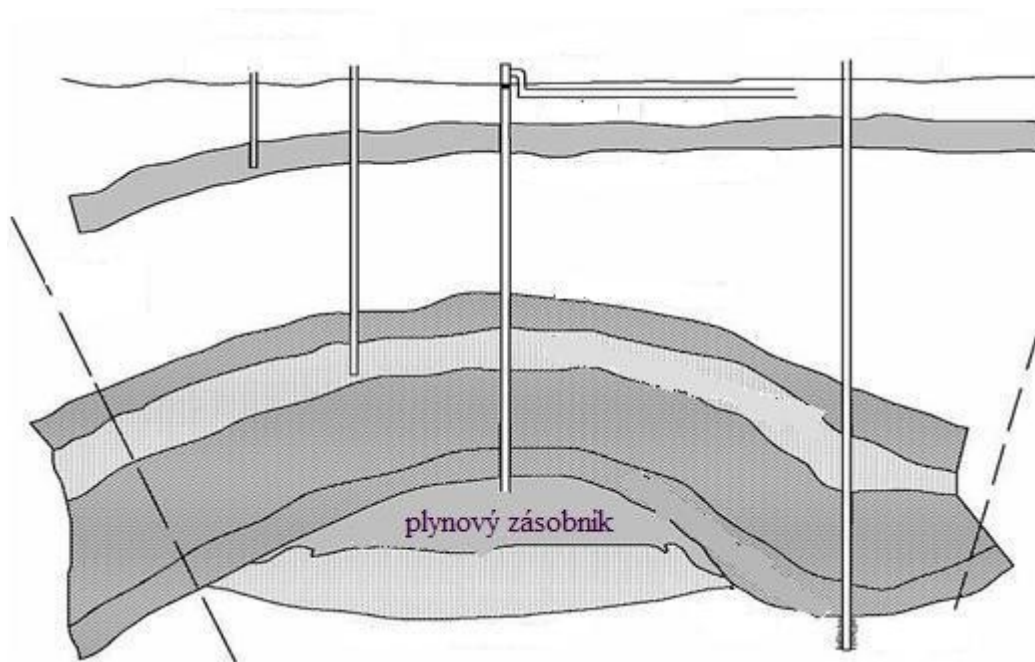
Špičkové zásobníky – slouží ke krytí spotřeby zemního plynu v krátkých obdobích, kdy je nutné do sítě dodat velké množství plynu v krátkém časovém období. Na rozdíl od sezonních zásobníků lze tyto zásobníky během zimního období znovu doplnit na maximální kapacitu. Ve světě se tyto zásobníky zřizují nejčastěji v solných kavernách (dutinách), které vzniknou vylouhováním části solného ložiska vodou, méně často se k tomuto účelu využívají jiné podzemní dutiny, jako jsou opuštěné uhelné nebo rudné doly anebo uměle vyražená kaverna. [22]

#### 3.1 Porézní zásobníky

Jedná se o vytěžená ložiska ropy a zemního plynu, která byla znovu využita pro skladování plynu. K uskladnění se využívají porézní horniny. Těsnicí vrstvu ložiska tvoří nepropustné horniny. Mezi zásobníky v porézních strukturách se řadí i tzv. aquiferové zásobníky.

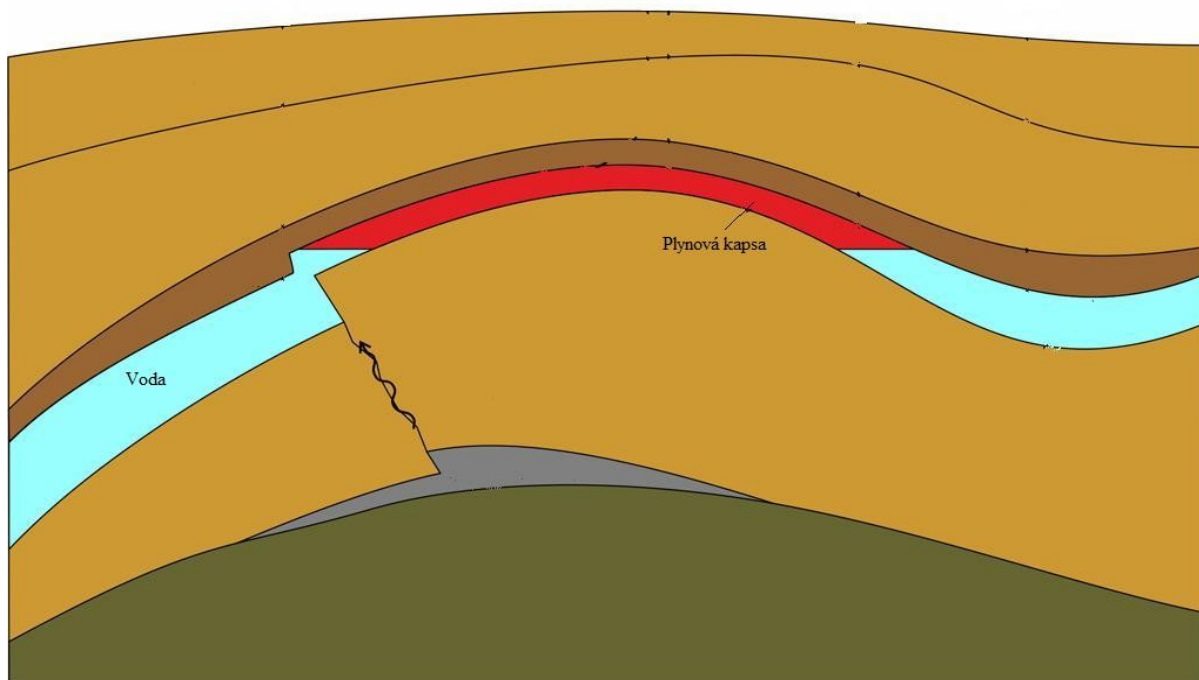
- Vytěžená ložiska ropy a zemního plynu (Obrázek 1) – právě vytěžená ložiska jsou nejvhodnějšími a nejpřirozenějšími místy pro následné uskladňování plynu. Jsou totiž tvořena vhodnými porézními horninami, které jsou nezbytné pro vtlačení a

uskladnění plynu, ale mají i přírodní těsnění v podobě jílu a dalších neprodyšných hornin, které celý podzemní prostor ohraničují. Porézní horniny jako pískovce, vápence apod. společně s horninami nepropustnými jako jsou jíly a jílovité břidlice představují tzv. ropné pasti, ze kterých je možné získávat ropu. A tyto ropné pasti se svými přirozenými vlastnostmi jsou po odčerpání zásob ropy velmi vhodné pro další využití prostoru například k zřízení podzemního zásobníku pro uskladnění zemního plynu. [4]



Obrázek 1: Zásobník ve vytěženém ložisku ropy nebo zemního plynu [19]

- Aquiferové zásobníky (Obrázek 2) – jsou zásobníky, které jsou vytvořené v původně zvodněných vrstvách písků a pískovců. Vlastní prostor je vytvořen vytěsněním vody z prostoru uskladnění plynu. Podzemní voda se nachází v řadě různých typů hornin, ale nejproduktivnější vrstvy jsou nalezeny v porézních, propustných horninách jako pískovce nebo v otevřených dutinách a jeskynních vápencových vodonosných vrstvách. Podzemní voda se v těchto materiálech pohybuje rychleji, což umožňuje rychlejší čerpání a další metody extrakce vody. Aquifery se také nacházejí v oblastech, kde je hornina z hustšího materiálu jako je žula nebo čedič, ale jen za předpokladu, že má hornina praskliny a zlomeniny. [4]



Obrázek 2: Aquiferový podzemní zásobník[20]

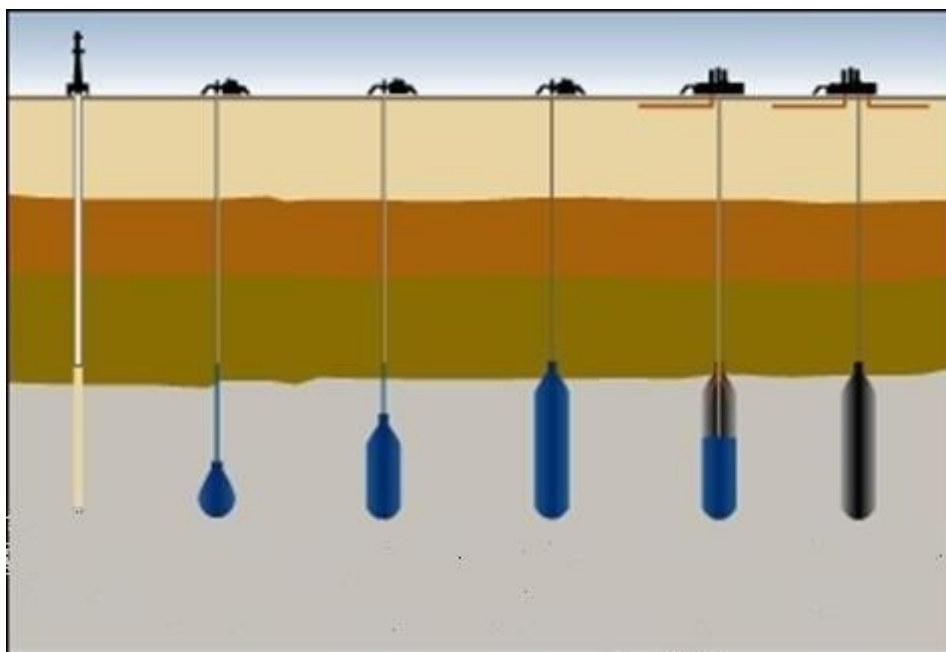
### 3.2 Kavernové zásobníky

Jako kaverny se označují podzemní prostory, jejichž všechny tři rozměry jsou přibližně stejného řádu. Jako největší podzemní prostory mohou plnit velké množství funkcí. Skladování v podzemní je velmi výhodné. Kaverny jsou uměle vytvořené dutiny vzniklé po těžbě hornin, jako jsou solné kaverny, opuštěné doly nebo vytěžené přímo za účelem skladování plynu. Kavernové zásobníky jsou vhodné pro vyrovnávání krátkodobých odběrových nerovností, protože u těchto typů zásobníků je doba potřebná pro změnu provozního režimu relativně krátká. Kapacitu zásobníků lze pak opětovně využívat během roku. [4]

### 3.2.1 Solné kaverny

Solné kaverny jsou uměle vyloužené prostory v solných ložiscích. Solné kaverny byly původně vyvinuty pro uskladňování zkapalněných uhlovodíkových plynů, protože solná struktura je dokonale nepropustná pro plyn. V současné době jsou používány k uskladnění zemního plynu. K vytvoření efektivní kaverny pro skladování zemního plynu v solném ložisku musí ložisko splňovat určité předpoklady mít dostatečnou mocnost, musí být uloženo v hloubce do 2 km a uložené soli by měly mít dostatečně stejnorodé vlastnosti. Kaverna se vytváří tak, že nejprve dochází k navrtání vhodného ložiska solných usazenin přibližně do hloubky plánovaného dna kaverny. Následně je do vrtu vtlačena voda, která rozpouští sůl a stejným vrtem je vznikající solanka odčerpávána (Obrázek 3). Vhodného tvaru kaverny je dosahováno regulací čerpané tekutiny. [4]

Solné kaverny jsou obvykle mnohem menší než zásobníky z vytěžených ložisek a než aquiferové zásobníky. Solné jeskyně nezadrží až tak velké objemy plynu, které jsou nezbytné pro spotřebu. Výkonnost ze solných kaveren je však mnohem vyšší. Umožňují, aby byl plyn, který je uložený v solné kaverně, čerpán a doplněn v mnohem rychlejších časových intervalech. Tento rychlý proces je velmi užitečný v nouzových situacích nebo během krátkodobého neočekávaného nárůstu poptávky po dodávkách zemního plynu. [4]



Obrázek 3: Schéma procesu vytváření solné kaverny[21]

### 3.2.2 Skalní kaverny

Kaverny ve skalních masivech většinou tvoří síť chodeb, která vznikla opuštěním důlního díla nebo byla pro tento účel vybudována (Obrázek 4). Nejdůležitější pro provoz je dokonalé utěsnění kaverny, což se v praxi řeší několika způsoby. Prvním možným způsobem je opatření kaverny vnitřním těsnícím materiálem. Druhou možností je hydrodynamické těsnění, kdy jsou případně pukliny a propustné horniny nad kavernou těsněny vodou, která je vtlačena do vodních injektážních štol nad kavernami. Tyto kaverny jsou většinou používány pro uskladnění LPG či stlačeného vzduchu. [4]



*Obrázek 4: Opuštěný důlní prostor použitý pro vytvoření kavernového zásobníku[8]*

#### 4. Skladování zemního plynu na území ČR

Na území České republiky je zemní plyn skladován v 8 podzemních zásobnících (Obrázek 5) a provozovány jsou několika provozovateli (Tabulka 1). A jedná se o jedny z největších zásobníků v EU. Zásobníky dokážou pokrýt při nízkých teplotách spotřebu plynu na 40 až 60 dní. [4]

Podzemní zásobník plynu	Uskladňovací kapacita milionů m <sup>3</sup>	Provozovatel
Lobodice	177	RWE Gas Storage
Tvrdonice	460	RWE Gas Storage
Štramberk	480	RWE Gas Storage
Dolní dunajovice	900	RWE Gas Storage
Háje	64	RWE Gas Storage
Dolní Bojanovice	576	Slouží pro Slovensko
Třanovice	240	RWE Gas Storage
Uhřice	180	MND
Rožná (plánovaný zásobník)	180	GSCeP, a.s.

Tabulka 1: Přehled podzemních zásobníků v ČR, uskladňovací kapacita a provozovatel

Celková kapacita podzemních zásobníků plynu v ČR nyní dosahuje k 3077 mil. m<sup>3</sup>.

PZP Lobodice je v současné době jediným i prvním zásobníkem aquiferového typu na území ČR. Zásobník je vytvořený v původní zvodnělé struktuře artézského systému.

PZP Tvrdonice je podzemní zásobník plynu využívající ke skladování zemního plynu primární ložiska ropy a zemního plynu, které byly částečně odtěženy.

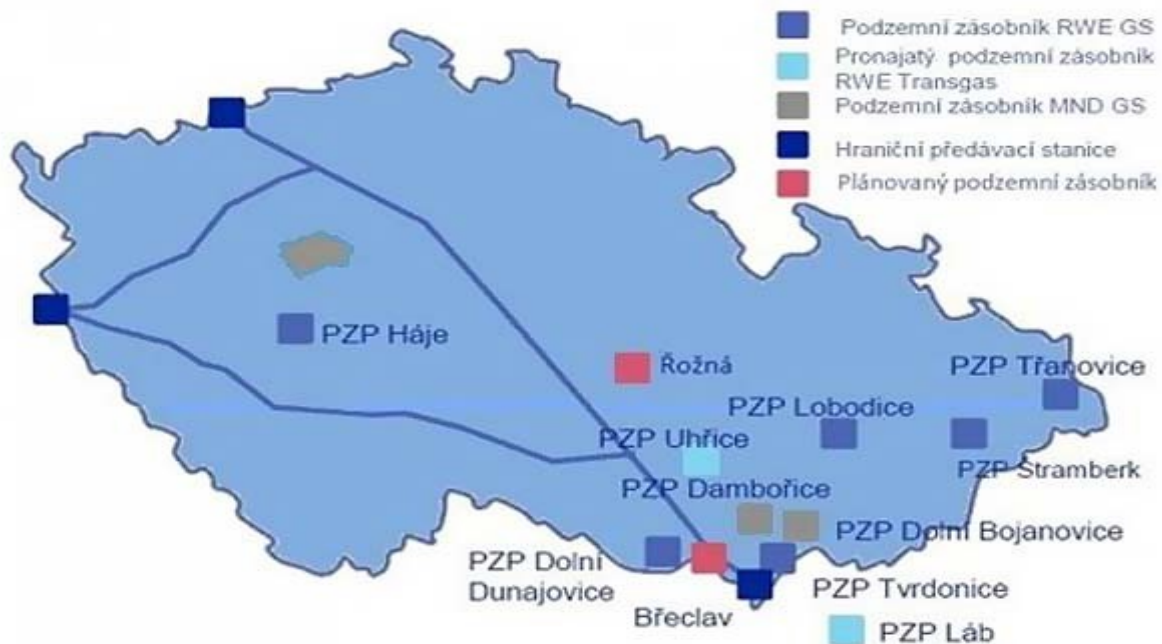
PZP Štramberk je podzemní zásobník vybudovaný z bývalého ložiska zemního plynu.

PZP Třanovice je také vybudován v prostorách bývalého ložiska plynu, na kterém se těžilo.

PZP Dolní Dunajovice je jedním z největších podzemních zásobníků plynu. Tento zásobník je vybudován v částečně vytěženém ložisku zemního plynu.

PZP Háje je podzemní zásobník kavernového typu. V ČR je jediným svého typu. Byl vytvořen v prostorách bývalého uranového dolu. [4]





Obrázek 5: Mapa podzemních zásobníků v ČR [7]

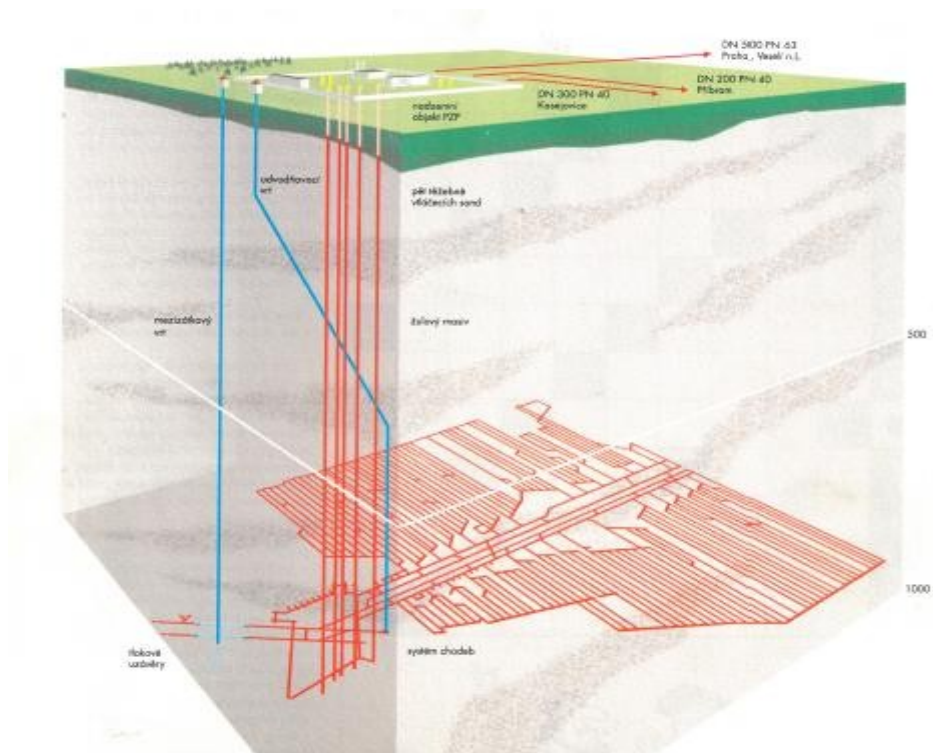
#### 4.1 Plynový zásobník Háje u Příbrami

Zásobník Háje je kavernový zásobník pro skladování zemního plynu v plynném stavu. Tento typ zásobníků byl doposud provozován pouze v solných kavernách a v opuštěných dolech. Plynový zásobník Háje u Příbrami je svého druhu prvním komerčně využívaným zásobníkem v krystalických strukturách ke skladování zemního plynu. Na konci sedmdesátých let v Čechách bylo třeba vyřešit a najít způsob, jak vykrýt rozdíly v nákupu a odběru zemního plynu ze sítě. Zásobníky pro skladování zemního plynu se nacházely příliš daleko až na Moravě, proto se začala hledat vhodná lokalita pro umístění zásobníku pro Prahu a okolní průmyslová centra. Jako geologicky nejvhodnější lokalita byla vybrána struktura středočeského plutonu. Tato lokalita se nachází asi 70km na jihozápad od Prahy. Byly vybrány podzemní prostory Rudných dolů Příbram a to konkrétně kaverna Bohutín. O několik let později přibýly ještě podzemní prostory výdušné šachty číslo 68-Milín, které patří k Uranovým dolům Příbram. A v těchto podzemních prostorách byly zahájeny zkoušky, zda jsou tyto prostory vhodné pro uskladnění zemního plynu z hlediska propustnosti, vlhkosti a pevnosti horniny. [10] [15] [3]

#### *4.1.1 Vytvoření skladovacích prostor*

Celá podzemní část tohoto zásobníku se nachází v žulovém masivu středočeského plutonu. Takto je charakterizován granodiorit blatenského typu, který dosahuje až na povrch. Jedná se o středně zrnitý granodiorit s frakcemi jemnozrnného biotitického až amfibolicko-biotitického granodioritu. Podzemní zásobník tvoří soustava chodeb s profilem 12 – 15 m<sup>3</sup>. Jeho celková rozloha v délce činí přibližně 45 060m a vytváří tak prostor pro skladování zemního plynu. K samotné stavbě byly využity šachty již existujících důlních děl a ty byly pak postupně rozšířeny. Vytváření skladovacích prostor pro zemní plyn bylo v žulovém masivu prováděno ražbou za použití lokálních odstřelů horniny. Vyražená hornina byla odtěžena na povrch a poté rozprodána, aby byla dále využita ve stavebnictví. Ražba probíhala v jednom horizontu se spádem 5 promile v hloubce od 961m u ústí pěti těžebních sond, pod hloubku 955m a na druhém konci zásobníku ve vzdálenosti přibližně 1350m. Prostor podzemního zásobníku přibližuje schéma viz. (Obrázek 6).[10] [15] [3]

Na některých místech docházelo k různým deformacím a nechtěným nežádoucím účinkům. Po vyražení chodeb byla hornina na některých místech silně rozvolněná a hrozilo, že by mohlo dojít k zavalení chodeb. Na těchto místech byla zbudována trvalá výztuž, aby nedošlo k zavalení chodby. Dalším problémem byla voda, která přitékala puklinami ve skalním masivu. Tato místa s průsakem vody byla dodatečně dotěsněná injektáží. Kde nebyly zjištěny žádné problémy, tam byly vyražené chodby ponechány bez povrchové úpravy. [10] [15] [3]



Obrázek 6: Schéma podzemního zásobníku Háje u Příbrami [15]

#### 4.1.2 Konstrukce tlakových uzávěr

Důležitou součástí celé spodní stavby je tlaková uzávěra, která uzavírá dva dopravní překopy. Ty zajišťovaly přístup do zásobníku. Na zkušebním tělese musel být ověřen matematický model zátky. Dále byly na zkušebním tělese zkoumány objemové změny tělesa zátky v závislosti na vývinu hydratačního tepla, těsnost okolní horniny, kvalita a technologie nástřikávaného drátkobetonu. Pro tento účel byla před zahájením výstavby definitivních zátek v přístupové chodbě k mezizátkovému vrtu provedena zkušební zátka, která posloužila jako zkušební těleso. Poté byla provedena injektáž zkušebního tělesa zátky a okolní hornina byla podrobena natlakování prostoru za zátkou směrem k mezizátkovému vrtu. Tímto bylo ověřeno chování masivu a zátky při vyšším tlaku než je hydrostatický tlak. Po vyhodnocení zjištěných hodnot byla definována technologie, jakou bude prováděn nástřik drátkobetonu. Také se stanovila samozřejmě technologie injektážních prací a byla stanovena kritéria pro vodní tlakové zkoušky. Proto, aby zůstal zajištěn přístup k mezizátkovému vrtu, byl do zkušebního tělesa zátky ručně proražen otvor. Na zkušebním tělese č. 2 se ověřovaly změny v technologii míchání, v dopravě a v nástřiku samotného drátkobetonu. [10] [15] [3]

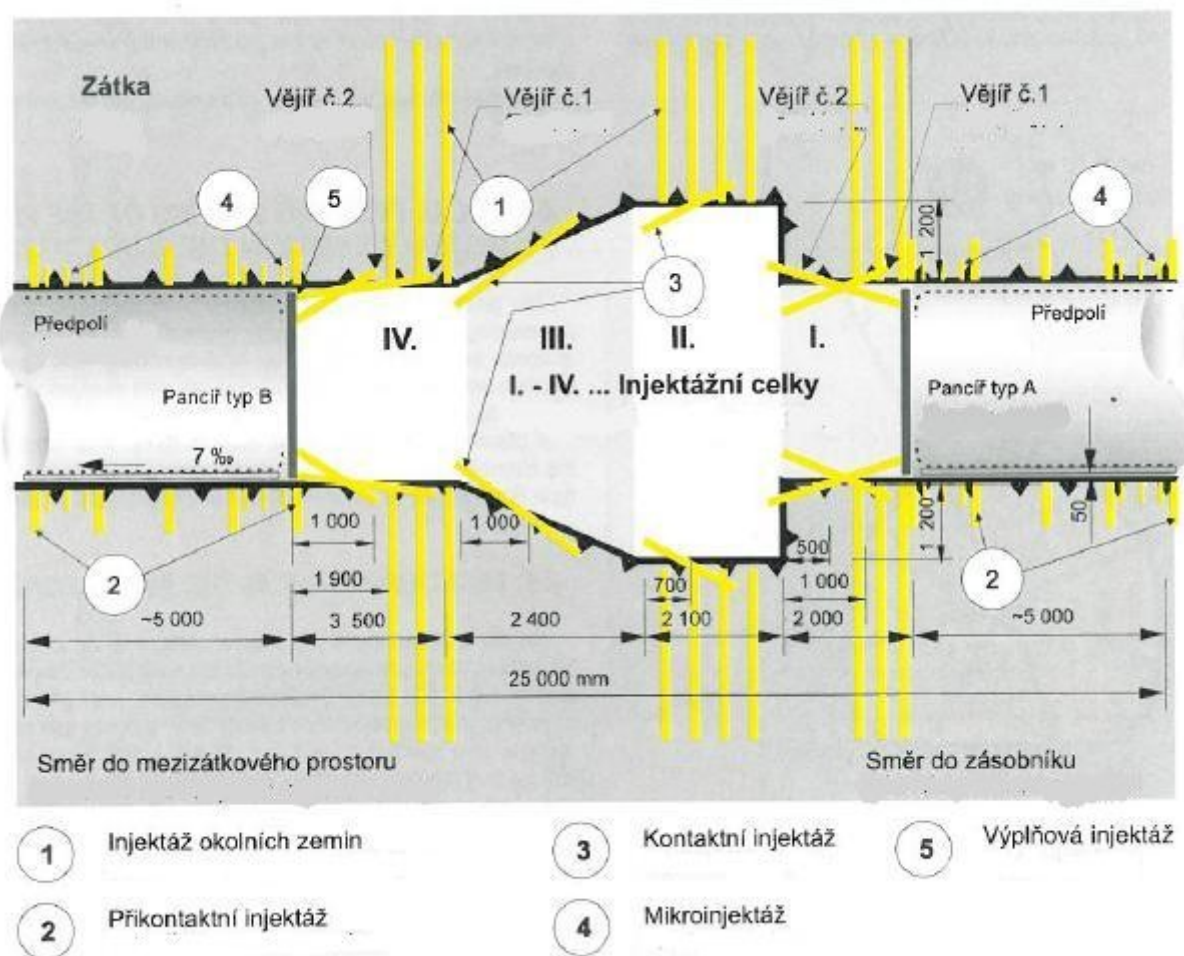
Tlakové zátky jsou konstruovány jako pevně vetknuté s vyloučením jakýchkoliv posunů na kontaktní ploše. Betonové těleso, z kterého je vytvořena, každá tlaková zátka, má celkovou délku 10m. Na vytvoření těles pro tlakové zátky, byla použita technologie stříkaného drátkobetonu. Jedna tlaková uzávěra se skládá ze čtyř tlakových zátek. Tlaková uzávěra je tedy tvořena dvěma dvojicemi tlakových zátek vzdálených od sebe 80m, vějířem zavodňovacích vrtů a monitorovacím systémem uzávěru. Profil překopu je uzavřen ocelovým pancířem. Tyto ocelové pancíře ohraničují betonová tělesa zátek z obou stran. [10] [15] [3]

#### *4.1.3 Zpevnění okolí horninového masivu betonové zátky*

Pro horninový masiv kolem zátky musela být také přijata některá opatření. Horninový masiv v okolí zátky byl zpevněn pomocí ocelových svorníků. V okolí betonového tělesa zátky musela být také zvýšena nepropustnost horninového masivu. Z tohoto důvodu se provedla injektáž horninového masivu a okolí zátky. [10] [15] [3]

Parametry injektážních prací (Obrázek 7):

- Injektáž okolních hornin – vrty v deseti vějířích po celém obvodu zátky v délce 7m a průměru 42mm. Injektáž byla provedena ve dvou etážích. Použité injektážní směsi – polyuretanový gel a polyuretanová pryskyřice. Injektážní tlaky 10MPa, a 15MPa. [3]
- Injektáž okolních manžetových zátek – jde o tzv. příkontaktní injektáž. V předpolí každé zátky byly vrtány vrty v délce 900mm vrtacími kladivy s průměrem vrtáku 29mm. Jako injektážní směs použita polyuretanová pryskyřice s maximálním injektážním tlakem 5Mpa. [3]
- Kontaktní injektáž – prováděna byla postupně během výstavby každé zátky. Provedena ve dvou etážích. Použitá injektážní směs – polyuretanová pryskyřice. Injektážní tlaky 3MPa, a 15MPa. [3]
- Výplňová injektáž – mezi osazením pancíře uzavírajícím zátku a betonovou plochou vznikl prostor, který bylo nutné vyplnit. Provedlo se pouze zalití tohoto prostoru upravenou směsí polyuretanové pryskyřice, protože hrozily deformace pancíře. Zalévání se provádělo postupně od spodu po klenbu. [3]



Obrázek 7: Provedení těsnicí injektáže tlakových zátek[3]

#### *4.1.4 Vodní tlaková clona*

Utěsnit skalní masiv, aby nedocházelo k únikům plynu v okolí zátky, v tomto případě znamená vytvořit vodní tlakovou clonu. Vodní tlaková clona se vytvořila kolem zátek na straně plynu. Aby mohlo dojít k vytvoření vodní tlakové clony, byly v předpolí ve vodní straně těchto zátek vyvrtány dva vějíře zavodňovacích vrtů. Zavodňovací vrty byly vedeny kolmo na obrys překopu. V mezizátkovém prostoru byly vyvrtány vrty v průměru 105mm a byly vrtány tedy vějířovitě pod úhlem 45°v délce 10m. Pomocí těchto vrtů dojde k zaplnění mezizátkového prostoru vodou. Tlaková voda působí jako protitlak proti tlaku zemního plynu. Voda, která se nachází v mezizátkovém prostoru a v zavodňovacím vrtu, proniká do puklin a trhlin v okolním horninovém masivu. Pomocí vrstvy dusíku nad vodní hladinou je v mezizátkovém prostoru udržovaný tlak vodní clony o 0,5 Mpa vyšší. Při poklesu hladiny vody v mezizátkovém prostoru je voda automaticky doplňována. Na nejnižším místě zásobníku je vytvořen odvodňovací vrt. Odvodňovací vrt je vybaven čerpacími trubkami a ejektorovým čerpadlem. Celý vrt je vystrojen pažnicemi. Ve spodní části odvodňovacího vrtu je jímka na vodu, která sem přitéká z celého zásobníku a pomocí ejektorového čerpadla se voda odčerpává z podzemí.

Zásobník plynu je s technologií na povrchu spojen sondami. Sondy jsou vtlačně-odběrové a jsou navrženy tak, aby fungovaly po celou dobu životnosti podzemního zásobníku. [10] [15] [3]

#### *4.1.5 Kontrolní monitoring*

Z hlediska bezpečnosti a kontroly je zde provozována monitorovací seizmická síť. Monitoring probíhá na sedmi monitorovacích stanicích. Aby bylo možno monitorovat obsah metanu v okolních půdních vrstvách, byla nainstalována také plynometrická síť. Tato síť byla rozmístěna ve stejných bodech jako seizmická monitorovací stanice. [10] [15] [3]

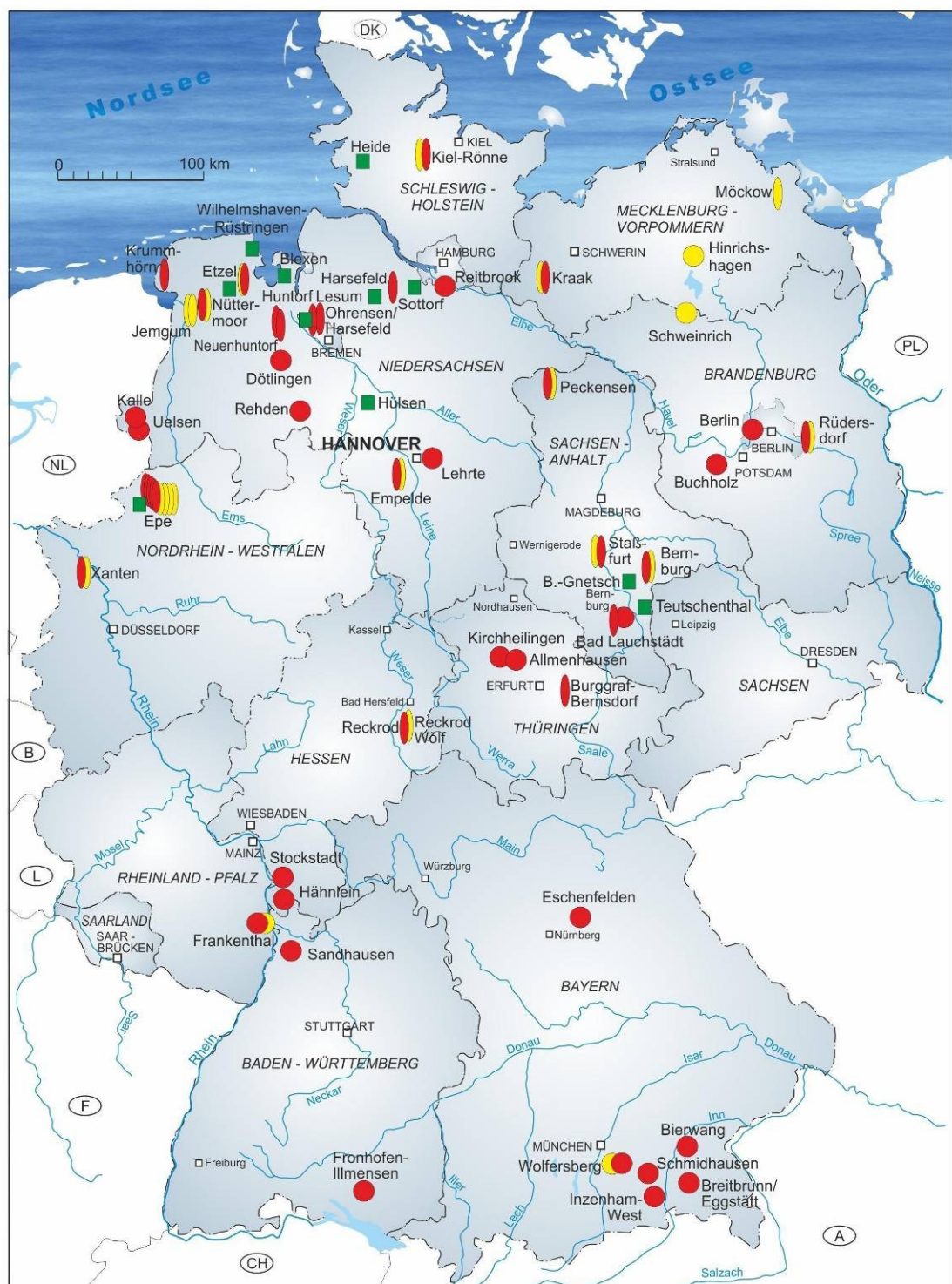
## 5. Skladování plynu v Německu

Německo má největší skladovací kapacitu pro zemní plyn v EU a čtvrtou největší na světě. Na toto poukázalo ve svém nejnovějším zpravodaji německé společnosti Energiewende Federální ministerstvo pro hospodářství a energetiku. Na vyrovnání nabídky a poptávky lze skladovat téměř 25 miliard  $\text{m}^3$  zemního plynu. [11] [17] [18]

Jen Spojené státy, Rusko a Ukrajina mají větší kapacitu než Německo, které se v EU řadí před Itálii a Francii. Kapacita se ještě má v příštích letech rozšířit. Koncem roku 2013 se skladovací kapacita německého zemního plynu zvýšil na 24 000 milionů  $\text{m}^3$ , což představuje nárůst o 5%. V roce 2016 byla skladovací kapacita Německa 260 TWh. Od roku 2016 se skladovací kapacita plynu zvýšila o 14 TWh. [17] [18]

Zařízení na skladování zemního plynu nezahrála významnou roli v dodavatelském řetězci. Teoreticky by celková německá skladovací kapacita plynu mohla činit zhruba 95 miliard  $\text{m}^3$ , v průměru za 80 dní. Přesné trvání závisí na skutečných úrovních plnění. V současné době jsou německé sklady plynu hlášeny jako naplněné v průměru 90%. Mapa podzemních zásobníků v Německu viz (Obrázek 8). [17] [18]





(Source: LBEG, 2010)

- Zemní plyn
- Zásobníky ve vytěžených ložiscích
- Zásobníky v provozu
  - Plánované zásobníky
- Solné kaverny
- ▬ Solné kaverny v provozu
  - ▬ Plánované kaverny
- Ropa a LPG
- Solné kaverny v provozu

Obrázek 8: Mapa podzemních zásobníků v Německu [11]



## 5.1 Geologické podmínky v Německu

Geologické podmínky pro skladování zemního plynu v Německu jsou velmi příznivé. Je však třeba rozlišovat vhodné geologické podmínky pro skladování v porézních horninách a v solných jeskyních. V severním, východním a jižním Německu se nacházejí především porézní pískovcové útvary. Zde se tedy především nalézají podzemní zásobníky v porézních horninách a to především zásobníky ve vytěžených ložiscích ropy a zemního plynu. Využívány jsou zejména k překlenutí sezonních výkyvů v dodávkách. V severním Německu se nachází oblast se solnými kopulemi, proto zde bylo vhodné horninové prostředí k vytvoření solných jeskyní jako podzemních zásobníků plynu. Z hlediska plnění a následného rychlého čerpání jsou solné kaverny výkonnější než zásobníky vytvořené ve vytěžených ložiscích. Solné kaverny jsou vhodné pro vyvážení v průběhu dne. [11]

Největší ložiska soli v Německu jsou tedy na severu mezi řekami Oder a Ems. Tyto ložiska soli byly vytvořeny zhruba před 250 miliony lety. Sůl je původně usazená v plochých vrstvách, ale velmi silný tlak a těžké usazeniny překrývající solné ložiska vytlačily sůl na mnoho míst, a tak vytvořily solné kopule s velkými objemy. Celkový objem ložisek soli v horninovém prostředí v severním Německu se odhaduje na více než 80 tisíc km<sup>3</sup>. [11]

## 5.2 Typy podzemních zásobníků v Německu

V Německu se nacházejí tyto druhy podzemních zásobníků:

- Solné kaverny
- Vytěžená ložiska
- Aquifery

Pro skladování zemního plynu v Německu jsou nejvíce využívány solné kaverny, kterých je v Německu velká většina z celkového počtu plynových zásobníků. Nejrozsáhlejší skladovací kapacitu má komplex solných kaveren EPE a Etzel.

## 5.3 Solné kaverny Etzel

Tento komplex kaveren byl konstruován firmou KBB a DEEP, která se specializuje na výstavbu podzemních zásobníků a to nejen v Německu. Kaverny jsou v pronájmu společnostmi UNIPER, STATOLL, Total, OMV, VNG gasspeicher, Gas Union, Crystal a EKB storage. V komplexu je skladováno několik druhů plynu. [11]

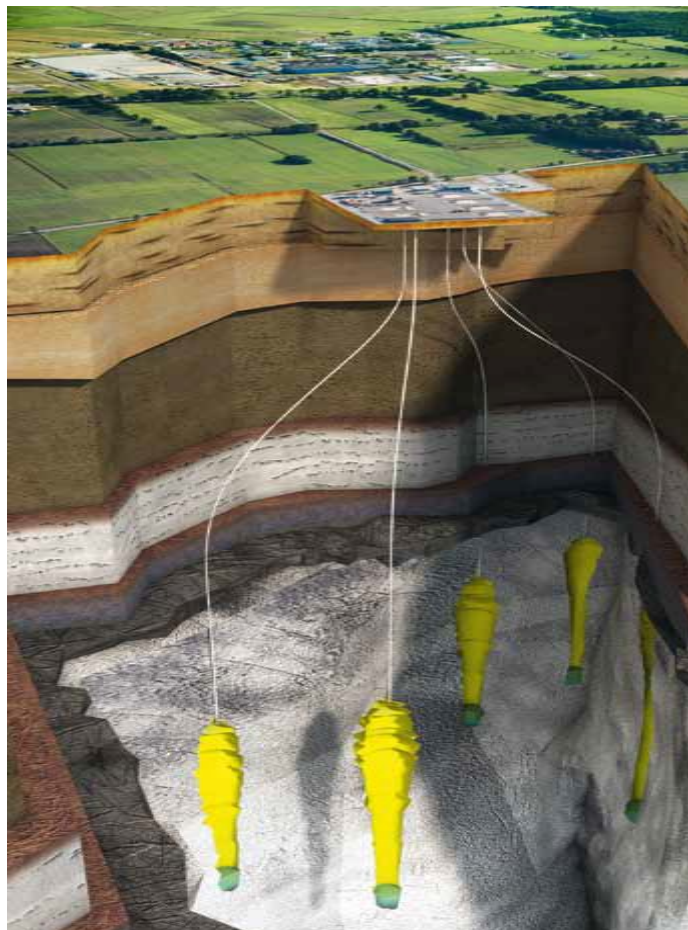
### 5.3.1 Historie vzniku

Na realizaci projektu podzemních zásobníků byla vybrána oblast Etzel (solná kopule se solnou špičkou v hloubce 0,8 – 0,9 km). Etzel představuje jedno z nejoblíbenějších geologických lokalit pro skladovací prostory. Projekt byl navržen pro skladování pohonných hmot. Rozhodnutí vlády založit Federální rezervu ropných produktů, rychle vedlo k zahájení vyluhování 33 kaveren v roce 1973. První podzemní zásobník plynu v Etzel vznikl okolo roku 1980, protože začala vzrůstat spotřeba zemního plynu. Původně se jednalo o přeměnu 9 ropných skladovacích kaveren na skladovací prostory pro plyn, proto aby byl pracovní objem plynu zvýšen nad 500 milionů m<sup>3</sup>. Od roku 1994 až do roku 1998 KBB naplánovala a postavila dalších 6 kaveren. Další kaverny postavila společnost DEEP v letech 2002 až 2004. Byly to první kaverny v Etzlu, které měly být zkonstruovány pomocí směrových vrtů vyvrtaných z centrální kaverny. Tato technika se od roku 2007 stala standardní pro rozšiřování solných kaveren. Od roku 2007 společnost Storage Etzel pokračuje v rekonstrukci kavernových prostor z pouhého úložiště ropy na jedno z největších zásobníků plynu v Evropě. Od roku 2009 se kavernový prostor rozšířil o více než 30 nových plynových kaveren. V procesu dokončení byly dvě plynové kaverny, které byly předány do užívání v prvním čtvrtletí roku 2017. [11]

### 5.3.2 Vytváření solných kaveren – technologie vrtání

Prvním krokem při vrtání nové solné kaverny je správné navrtání kavernové šachty. Šachta musí být svislá pod úhlem <1° v místech, kde už dochází k rozpouštění soli pomocí těžebního roztoku a samotnému vytváření vlastní kaverny. Při vrtání v tvrdších vrstvách se šachta může odchýlit ve velkém úhlu od vertikální osy až do 35°, ale pokroky v technologii směrového vrtání (Obrázek 9) umožnily vrtat kavernové otvory, s minimální odchylkou. Kavernové otvory jsou vrtané v požadované hloubce pod povrchem, kdy vrtací souprava se nachází na povrchu. Nové kavernové šachty vrtané pomocí této technologie často mívají tvar písmene S. To je možné právě díky technologii směrového vrtání, která umožnila zde použít v praxi metodu odbočovacích vrtů. Tento způsob vrtání je umožněn díky motoru, který je umístěn přímo za vrtákem a je poháněn vrtným roztokem vháněným dolů přímo na vrták. Vrtací zařízení vyvíjí tlak k zatlačení vrtáku do horniny a také tlak k zatlačení potrubí pro vhánění vrtného roztoku, které je pumpováno dolů přes vnitřek vrtného potrubí. Výhodou směrových vrtů je to, že namísto konstrukce samostatných kavernových šachet na povrchu pro každou solnou kavernu a místo propojení každé z těchto samostatných šachet, až k infrastruktuře na povrchu, je zapotřebí pouze několika málo šachet nebo ohraničený prostor,

pro rozvrtání více šachet najednou. To znamená, že z každého takového prostoru, lze rozvrtat až sedm kavernových vrtů. Tato technika se používá přímo pod zastavěnými nebo chráněnými oblastmi, protože tato technologie to již umožňuje. Tyto oblasti byly dříve nevhodné k využití a to jen díky tomu, že se vrtání provádělo konvenční metodou svislých vrtů. [11]



*Obrázek 9: Způsob vrtání solných kaveren – využití směrové vrtání [11]*

### *5.3.3 Postup při vrtání*

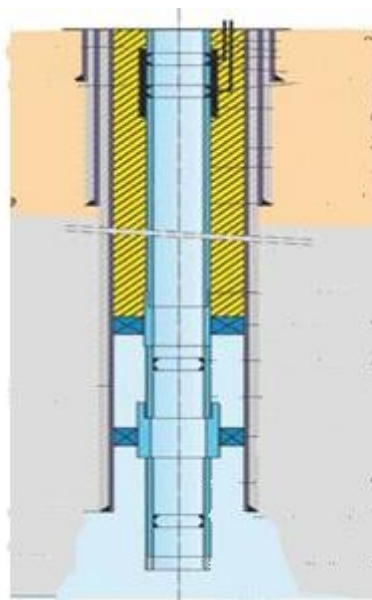
Vlastní vrtání kaverny se provádí ve dvou fázích s dvěma různými velikostmi vrtné korunky. V první fázi vrtání je použita velká vrtací korunka k navrtání tvrdých vrstev horninového masivu. Tato část je vyvrtávaná s použitím vrtného roztoku, aby nedocházelo k poškození horních horizontů podzemních vod. Potom se do tohoto otvoru zavede kotvící trubka a provede se zpevnění cementem. Speciálně navržená vrtná korunka s dlouhými zuby se používá k vrtání měkkých hornin při vrtání solné jeskyně až do plánované celkové hloubky. Nejhlubší část toto vrtu se později rozvíjí do požadované velikosti solné kaverny.

Aby se sůl, která se dotýká vrtáku, nerozpustila už v průběhu vrtání, je tento úsek vrtán s roztokem z nasycené slané vody. [11]

Během vrtání se pro ověření geologické struktury každého místa v jeskyni odebírají vzorky jádra v délce 9 metrů a pro odběr vzorků se vrták zastavuje přibližně každých 50 až 100 metrů. Toto odebrané jádro poskytuje důležité údaje a informace o lokální litologii soli, které se následně používají k naplánování těžby a k výpočtu hlavních horninových parametrů. Kvalitně odebrané jádro, je proto nezbytné pro pozdější plánování a realizaci kaverny. [11]

#### 5.3.4 Proces vylouhování kaverny

Jakmile bylo dokončeno zpevnění konečného zpevňujícího pláště, začala příprava na těžbu. Přípravy zahrnují výměnu vrtného roztoku se slanou vodou za soustavu pro vylouhování soli s osazením hlavice pro vylouhování soli. Před zahájením procesu těžby se provede hydraulický test, aby se potvrdila těsnost zpevňujícího pláště. Následně se přistoupí k samotné těžbě a vytvoření vlastní kaverny do požadované velikosti. Po ukončení těžby jsou kaverny dokončeny a vybaveny pro jejich plánované využití. Cílem dokončovacích procesů bylo navrhnout každou složku provozních podmínek na základě osvědčených postupů tak, aby fungovaly bezpečně během celého období své životnosti. Vrt je po dokončení procesu osazen výpažnicemi, vyztužen, uzavřen potřebnými uzávěry a připraven k využití (Obrázek 10). [11]



Obrázek 10: Průřez kompletně vyztuženým vrtem solné kaverny[11]

## 6. Skladování plynu v Norsku

Norsko je jedním z hlavních dodavatelů zemního plynu přes plynovod. Ale v Norsku se také nacházejí ropné rafinerie. Norsko se loni stalo největším dodavatelem zemního plynu do zemí západní Evropy. Podle předběžných dat norského provozovatele plynovodů Gassco se vývoz do Evropy loni pohyboval okolo 108,6 miliardy m<sup>3</sup>. [12] [14]

### 6.1 Geologické podmínky Norska

Norsko je součástí prekambriického štítu. Dvě třetiny Norska jsou pokryty prekambriickými horninami – staršími více než 600 milionů let, přičemž dominují různé typy ruly. Jiné druhy hornin z této éry jsou žula, gabra a křemence. Přibližně jedna třetina Norska je pokryta skalami kambricko-silurského věku. Větší část těchto hornin je metamorfovaná, avšak v různé míře. Skalní horniny, jako jsou ruly, stejně jako pískovcové kameny, břidlice, vápence a další nezměněné horniny tvoří horskou oblast, která prochází centrálními částmi země. V geologicky jedinečné oblasti Oslo jsou horniny částečně tvořené nemetamorfovanými kambricko-silurskými břidlicemi a vápencem a částečně rozrušenými horninami. [12]

Z inženýrsko-geologického hlediska jsou zde pevné skalní horniny. Horniny byly vystaveny namáhání, která mohou mít velký vliv na stabilitu tunelů a podzemních prostor. Dalším komplikujícím faktorem jsou nepravidelné tlaky v horninových masivech způsobené tektonickými událostmi vyplývajícími ze strmé a nepravidelné topografie. Vyskytují se také vysoká tektonická napětí. Kvůli geologickým a tektonickým událostem, které vytvořily krajinu, je horninová hmota také těžce rozrušena různými typy nespojitostí, od prasklin a spár až po zóny obsahující úplně rozložený materiál. Tektonicky je v současné době provincie stabilní pro všechny praktické aspekty týkající se tunelování. V Norsku dominuje hydrogeologická situace s vysokou hladinou podzemní vody, také v hornině, která je výsledkem velkého množství srážek. Jednou z výhod tohoto režimu podzemních vod, které obklopují podzemní konstrukci, je to, že poskytuje přirozený gradient, který působí směrem k otvoru, což umožňuje využití skladovacích prostor v podzemí. Na druhé straně jedna nevýhoda takových nasycených podmínek je riziko, že tunelovací činnost může narušit stav podzemních vod, a to může mít nepříznivý dopad na povrchové struktury. Samotná hornina je prakticky nepropustná a pórovitost je zanedbatelná. To znamená, že propustnost (k) vzorku horniny je pravděpodobně v rozmezí 10–12 m/s, ale v muze se lišit podle oblasti. [12]

## 6.2 Typy podzemních zásobníků

V Norsku jsou nejvíce využívány kavernové zásobníky. [12]

## 6.3 Oblast Mongstad

Oblast leží poblíž Norského města Bergen a počet kaveren v této oblasti je opravdu hojný. Zde má působit firma Statoil, jedna z největších rafinerií na těžbu ropy a zemního plynu v Norsku. Zemní plyn je z této oblasti dodáván téměř do celé západní Evropy přes ropovody. V kavernách zde skladují propan. A aby bylo možné uspokojit zvyšující se nároky na skladovací kapacitu propanu, byla postavena další podzemní skalní kaverna. [12] [14]

Dnes se v Mongstadu používá 27 skalních kaveren pro účely skladování ropy, produktu z těžkého topného oleje a propanu. [12] [14]

### 6.3.1 Projekt Vestprosess

Na podzim roku 2001 uzavřela firma MIKA AS kontrakt s provozovatelem zásobníků Statoil v Norsku k výstavbě propanové skladovací kaverny. Statoil je hlavním provozovatelem projektu Vestprosess, který je umístěn v rafinérii Statolil v Mongstadu. Celkový objem je 62 000 m<sup>3</sup> a má být doplněním stávající propanové kaverny v závodě. Nová kaverna byla navržena a zkonstruována podobně jako předchozí, i když s použitím různých přístupů k uzavření přítoků vody a chlazení kaverny k minimalizaci úniků vody do kaverny byly zavedeny přísné normy pro injektáž. Co se týče procesu chlazení tak namísto použití přímého chlazení propanem byla kaverna nejprve ochlazena vzduchem a dále ochlazena propanem. Kaverna má tvar ležící láhve se vstupem do kaverny v krku kaverny. Přístup do kaverny probíhá přes 600m dlouhý přístupový tunel. Kaverna je utěsněna betonovou zátkou. [12] [14]

Tento projekt je se svým potrubím z Kollsnes a Sture v Øygarden do výrobního závodu v Mongstadu, severně od Bergenu novou výzvou. Výrobní závod se stal hlavním vývozcem propanu a butanu. V roce 1999 byla vybudována kaverna s 60 000 m<sup>3</sup> skladovacího prostoru pro propan spolu s podobnou kavernou pro butan. Propan byl skladován v kapalně formě při atmosférickém tlaku a teplotě – 42°C. Po propadu stropu kaverny z důvodu nedostatečného těsnění a podepření před zahájením chlazení došlo k propadu stropu kaverny a disponibilní skladovací prostor se zmenšil na 40 000 m<sup>3</sup>. V důsledku toho bylo nutné vytvořit nový skladovací prostor. [12] [14]

### 6.3.2 Provedení projektu

Konečná velikost kaverny má výšku 34 metrů, šířku 21 metrů a celkovou délku 134m. Čerpací jímka byla umístěna bezprostředně pod šachtou na konci kaverny. Ražba byla prováděna nejdříve vyražením vrcholu a následnou ražbou zbývajícího objemu dvěma horizontálně vyražených lavic (Obrázek 11). [12] [14]



Obrázek 11: Ražba propanové kaverny[14]

### 6.3.3 Podpora horninového masivu

Skálu v oblasti tvoří tmavá rula, amfibolit a gabro. Pro klasifikaci bylo zvoleno klasifikační řešení na základě postupných výpočtů hodnot  $Q$  – tak, aby daná hodnota  $Q$  udávala úroveň podpory horninového masivu pomocí kotev. Délka kotev se pohybovala mezi 4 – 5m. Pět metrů dlouhé kotvy byly použity na stropě, zatímco čtyřmetrové kotvy byly instalovány ve stěnách opěří. Všechny kotvy byly komplexně navrženy a průměr kotev stanovený na 25 mm. Kromě toho byly kotvy použity k dočasné podpoře. V 85 procentech kaverny byla podpora hornin podle výztužní třídy B1 – špatná kvalita horniny, zajištěna vyztuženým stříkaným betonem v tloušťce 10 – 15m. Přetvoření ocelových kotev v důsledku chlazení nebyla vzhledem k poměrně vysokému bezpečnostnímu faktoru považována za výrazný dopad na stabilitu skalní kaverny. [12] [14]

Nejhorší vlastnosti hornin se objevily na konci kaverny. Rozsah použití kotev byl zde největší. Trvalá horninová podpora zůstala podle plánu, aniž by bylo nutné vzít v úvahu dočasnou výztuž. Kromě toho bylo v této porušené oblasti aplikováno více stříkaného betonu, než bylo plánováno. [12] [14]

#### *6.3.4 Vodní clona*

Aby se udržel tlak podzemní vody v okolí propanové kaverny, bylo provedeno navrtání asi 2 000m dlouhé vodní sítě okolo kaverny. Vrtání bylo provedeno pomocí pneumatického vrtacího zařízení s vrtným roztokem, aby bylo zajištěno bezpečné vrtání v skalní hornině, ve které by při vrtání mohli narazit na plynovou kapsu z existujících sousedních kaveren. Vodní síť se skládá z horizontální vodní clony vyvrtané z bočního tunelu nad nebo v blízkosti kaverny a vertikální vodní clony navrtané z povrchu. Vodní sítě byly zavedeny již před zahájením ochlazování. Tím bylo zajištěno, že celá okolní oblast pevné skalní horniny budou naplněny vodou a stanou se vodotěsnými, když voda zamrzne. Tlak vodní clony se udržuje na hodnotě 0,5 MPa. [12] [14]

#### *6.3.5 Chlazení kaverny*

Nepropustná zóna ledu kolem kaverny uzavírá přítok vody do plně ochlazené propanové kaverny. Zmrazená zóna se vytváří udržováním tlaku vody ve skále kolem vodní clony s přívodem vody z povrchu. Tato síť přívodu přes kavernu vyplňuje všechny nové praskliny a zamrzne na led nejbližší povrchu kaverny. Pravidelně se provádějí kontroly, aby vodní sloupec v regulačních jímkách kolem kaverny měl dostatečnou úroveň, aby se zabránilo úniku plynu do okolní horniny. V případě nové propanové kaverny, bylo rozhodnuto, že chlazení by mělo být provedeno ve dvou fázích. Nejprve se vzduchem, a pak další chlazení propanem dokud teplota v kaverně nedosáhne provozní teploty – 42 °C (Obrázek 12). S tímto řešením se očekávalo, že pokud se v kaverně vyskytne jakýkoliv stabilitní problém bude možné provést veškerá opatření dříve, než bude pozdě a dojde k poškození kaverny. [12] [14]





*Obrázek 12: Mrazicí proces stěn propanové kaverny[14]*

Chladicí zařízení (Obrázek 13) bylo instalováno právě v přístupovém tunelu v betonové zátce. Chlazení je založeno na použití chladicí kapaliny a to amoniaku, který prostřednictvím speciálního zařízení s tenkou vrstvou chloridu vápenatého ochlazuje kavernový prostor. Chladicí kompresor má výkon asi 700 kW. Potrubí pro oběh roztoku bylo instalováno z portálu do kaverny a muselo být přizpůsobeno nízkým teplotám, velkým tlakovým zatížením a relativně velkým proudům tekutin. [12] [14]



*Obrázek 13: Mrazicí zařízení [14]*

Aby bylo chlazení co nejúčinnější a nejjednodušší, bylo rozhodnuto, že je třeba před zahájením procesu chlazení minimalizovat průnik vody do kaverny. Jako konstrukční kritérium bylo proto pro celou kavernu nastaveno snížení průtoku na hodnotu  $< 15 \text{ l/min}$ . [12] [14]

#### 6.3.6 Injektáž

Program injektáže byl vypracován podle filozofie čím jednodušší tím lepší. Rozsah směsí byl udržován na minimu  $w/c = 1$  a  $w/c = 0,8$ . Směs byla z mikrocementu typu Rheocem 900 a jedinou přísadou byl superplastifikátor Rheoceil 2000 PF. Tlak použitý při injektáži byl nastaven na 8MPa. Rozhodnutí o použití tohoto injektážního materiálu bylo provedeno kvůli jeho dobrému pronikání do horniny. Základním principem pro horninové injektáže bylo pravidlo, že okolní hornina musí být co nejteplejší, aby odchylka od izotermy nebyla moc velká. [12] [14]

Vlastní injektáž byla provedena v podstatě dvěma samostatnými čerpadlovými jednotkami. Kromě toho bylo vždy k dispozici rezervní čerpadlo. Proces míchání a kontrola byla řízená počítačem. Aby byly použité stroje při injektáži odolné vůči vysokým tlakům, byly použity speciální stroje, které byly vylepšeny o dvojité zadní desky s dalšími pojistnými mechanismy. Ventily a injektážní hadice byly schváleny pro vysoké injektážní tlaky. Rozšíření strojů umístěných do otvorů bylo provedeno hydraulicky. Byly provedeny speciální injektážní opatření kolem koncové stěny a šachty. Horninový masiv byl navíc předběžně ošetřen z povrchu. Po dokončení injektáže byly provedeny měření úniků vody a získaný výsledek byl  $2 \text{ l/min}$ , čímž se splnila podmínka v rámci požadavku  $< 15 \text{ l/min}$ . [12] [14]

#### 6.3.7 Šachty

Pro technické účely bylo vytvořeno šest šachet. Šachty mají průměr až 2,1m a každá má délku kolem 70m. Šachty jsou navrženy tak, aby byly použity pro čerpání a vypouštění propanu, ale také pro přístrojové vybavení a různá měření. Kolem šachet byla provedena injektáž a šachty byly obetonovány. Po betonáži bylo pozorováno na kontaktu betonu s horninou určité menší množství vody. Okolí bylo utěsněno injektáží zevnitř kaverny, za použití polyuretanové pryskyřice. Pro vytvoření této bariéry byly injektovány 500 litry silikagelu Meyco MP 320. Jedna z kavernových šachet viz. (Obrázek 14). [12] [14]



*Obrázek 14: Jedna z kavernových šachet [14]*



### 6.3.8 Betonová zátka

Betonová zátka byla umístěna ve vchodu do kaverny (Obrázek 15). Jednalo se prakticky o jednoduchou betonovou konstrukci o délce 7m. Měla být odlita poté, co začalo chlazení vzduchem, ale během chlazení měl být zachován přístup do kaverny. Byl navržen přístupový tunel, který umožňoval přístup malým strojům a zařízením. Z bezpečnostního hlediska bylo toto řešení příznivé. Zátka byla odlita do tří hlavních částí (s délkou jednotlivých částí 2m, 3m a 2m) a také byla provedena injektáž. Jako poslední bod, který bylo třeba provést před plněním propanu, bylo odlití poslední části zátky a vyplnění přístupového tunelu vodou. Pro aktivní chlazení zátky byly zřízeny chladicí okruhy tak, aby se voda, která pronikala do zátky nebo kolem ní, změnila na led a zabránila tak únikům propanu. [12] [14]



Obrázek 15: Pohled na dokončenou betonovou zátku [14]

## **7. Podzemní zásobník v Indii**

Za účelem zajištění energetické bezpečnosti jsou federální zásoby ropy uloženy v obrovských podzemních skladovacích kavernách. Strategické lokality jsou vybrány s možností poskytnout nejpružnější prostředky v národní ropné a plynárenské dopravní síti. Tyto sítě jsou obsluhovány prostřednictvím mezistátních potrubí, prostřednictvím lodí nebo za pomoci specializovaných loďstev. Výběr koncepce skladování pro podzemní skladování ropy a zemního plynu se provádí podle požadavků na skladování, geologického průzkumu lokality, kvality podpovrchové horniny, zařízení pro nakládku a vykládku skladovacích produktů, a podle bezpečnosti a podmínek prostředí. [2]

### **7.1 Druhy podzemních zásobníků v Indii**

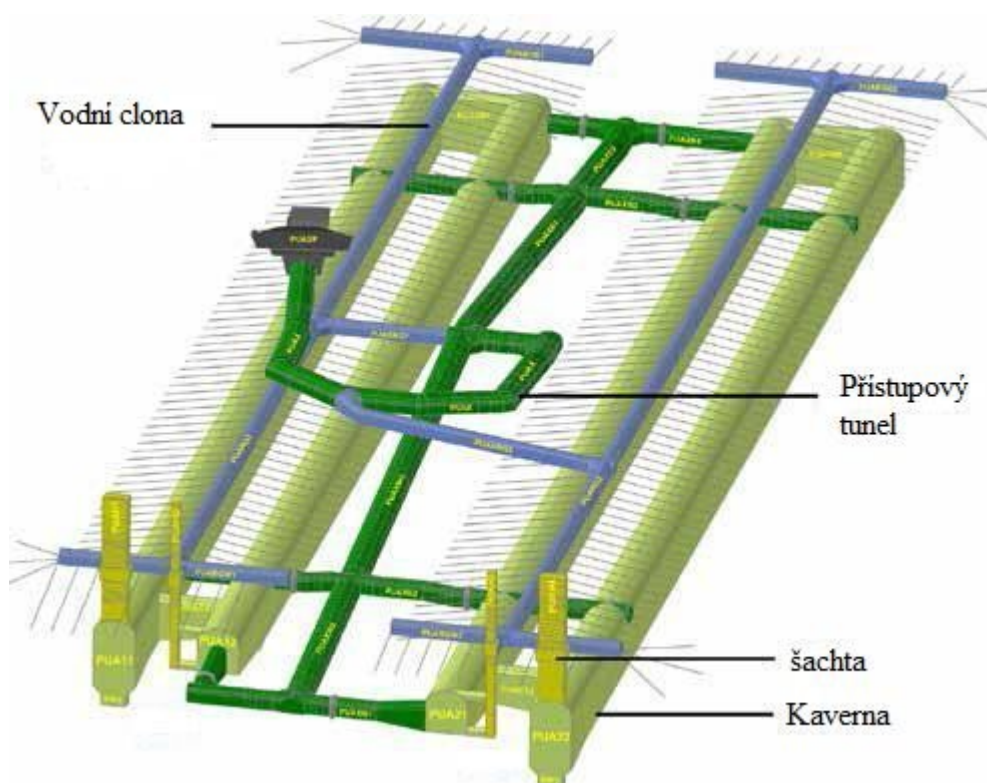
Obecně se používá pět různých typů podzemních skladovacích prostor. [2]

- Porézní zásobníky ve vytěžených ložiscích ropy, zemního plynu nebo aquiferové zásobníky
- Podzemní betonové tankery
- Kavernové podzemní zásobníky

### **7.2 Projekt Padur**

Místo v Padure v okrese Udipi se nachází na západním pobřeží v jihozápadní části Indie v Katarnaka. Geograficky je poloha lokality na kopcovitém terénu. Jedná se o vlnitý kopcovitý terén procházející údolím orientovaným zhruba na východo-západ. [2]

Skladovací kaverna v Paduru (Obrázek 16) zahrnuje dvě paralelní kaverny s dvojicí do U tvarovaných tunelů o délce 656 a 700m. Celková délka kavernového komplexu je 2772m. Šířka kaverny je 20m a maximální výška je 31,4m. Přístupové tunely měří 1570m a vodní clonové tunely mají celkovou délku 1940m. Kaverna má dvě hlavní šachty (čerpací šachty) o rozměrech 12 x 6m a vstupní šachtu o rozměrech 4 x 4m o celkové délce 321m. Součástí celého komplexu je také výstavba osmi tunelových zátek a čtyř šachtových zátek, výroba potrubí a montážních prací. Komplex byl vybudován za využití Nové rakouské tunelovací metody. [2]



Obrázek 16: Schéma komplexu ropných kaveren v Padure[2]

### 7.2.1 Geologické podmínky

V oblasti do které spadá projekt Padur se skládá z granitických rul, migmatitů spolu s žulami a s tmavě zbarvenými minerály jako jsou pyroxeny a olivíny. Ruly se skládají z bílých pásů křemenu a živců, které se střídají s tmavými pásy obsahující amfibolity, biotity a další drobné tmavé minerály. Žuly jsou porfyrické až granulované s typickým systémem křemencových žil. Na místě byly odhaleny tři hlavní vertikální diskontinuity a jedna horizontální diskontinuita. Hlavní tektonické a geomorfologické rysy jsou rovnoběžné s těmito nespojitostmi. V této oblasti bylo provedeno zkoumání celkového geologického stavu a také geotechnického stavu oblasti. [2]

### *7.2.2 Proces výstavby*

Ražba byla prováděna za použití konvenčních metod vrtání s vrtacími stroji. Odkliz horniny byl prováděn pomocí nakládačů. Přístupové tunely mají šířku 12m a výšku 8m. Průjezdny tunely jsou navrženy na rozměr 8 x 8m. Ražba tunelů byla prováděna NRTM s horizontálním způsobem ražby ve třech úrovních. Nejdříve byla vyražena kalota a poté zbylé další dvě úrovně. Šachty byly vyhloubeny z povrchu. Při ražbě byla použita pro rozpojení horniny metoda trhacích prací. [2]

### *7.2.3 Vyztužení okolní horniny*

Okolní hornina byla zařazena podle norského indexu kvality Q do skupiny B2. Pro podporu okolní horniny byly použity skalní kotvy o průměru 25 mm a délce od 3m do 8m. Aby bylo zajištěno správné pokrytí skalních kotev maltou, byly instalovány centrátoři. Vnitřní prostory kaverny byly ošetřeny vrstvou stříkaného betonu. [2]

### *7.2.4 Vodní tlaková clona*

Vrtalo se 254 otvorů vodní clony o průměru 95mm až do délky 55 – 57m z vnitřní strany vodního přístupového tunelu. Bylo nutné dodržet poměrně přesnost při vrtání, protože povolená odchylka byla pouze 5 %. Celková délka vrtů vodní clony byla 12 145m. Vrty vodní clony po dokončení byly zaplněny vodou z dočasného napájecího vedení z vnější strany tunelu a každý jednotlivý otvor byl připojen na měřiče průtoku a tlaku vody. Tlak a průtok vody je nutné sledovat každý den z důvodu průsaku vody do skalního masivu. Tlak nesmí být nižší než 0,4MPa a v žádném z monitorovaných otvorů by neměla hladina klesnout pod 20m.n. m. Na 13 místech byly vyvrtány monitorovací studny a ty byly opatřeny piezometry pro monitorování hladiny podzemní vody v okolí. Musely být provedeny zkoušky těsnosti kaverny. Po dokončení a vyhodnocení těsnosti kaverny byl tunel vodní clony zcela naplněn vodou, a tak bylo zajištěno hydraulické uzavření prostoru. [2]

### *7.2.5 Monitoring*

Kromě již zmíněných kontrol hladiny podzemní vody pomocí piezometrů, je při pravidelném geotechnickém sledování kontrolován průběh deformací v kaverně již během výkopu pomocí extenzometrů. [2]

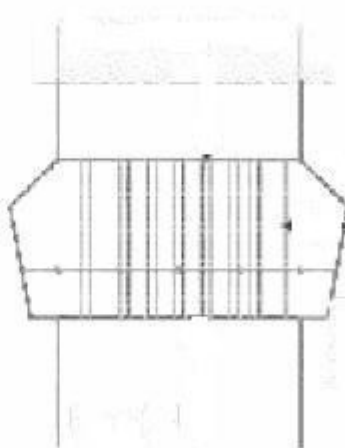
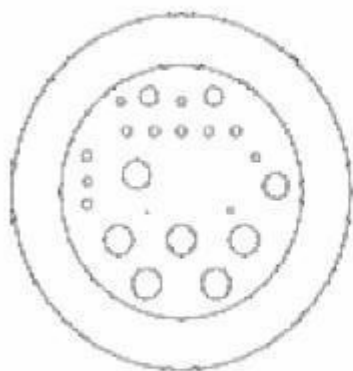
### 7.2.6 Konstrukce tunelové zátky a šachtové zátky

Zátky byly vyrobeny z betonové směsi M40 z portlandským cementu tak, aby byly odolné vůči síře, protože betonová zátka je v přímém kontaktu se skladovanou směsí. Tunelová zátka byla umístěna na vybraném místě přístupového tunelu ve vertikálním směru (Obrázek 18). Je navržena tak, aby odolala tlaku ropy a tlaku plynné fáze nad hladinou oleje, která je kolem 1,5 MPa. Zátka musí také odolat tlaku vodní clony na vnější straně zátky, která slouží k hydraulickému uzavření okolí kaverny. Vzhledem k tomu, že v případě výbuchu v kavernách může být zátka také ovlivněna generovanou tlakovou vlnou, se navrhuje náhodné zatížení na 2 MPa. A tato hodnota vyhoví jak tlaku způsobenému vodní clonou, tak i případnému výbuchu. Hodnota tlaku vodní clony je navržena na 0,5 MPa. Celková tloušťka tunelové zátky je 5m. Tunelová zátka je konstruována v jednofázovém procesu. Na rozdíl od šachtových zátek (Obrázek 17), které jsou prováděny ve dvou fázích o délce první fáze 1,5 m a druhé fáze 2,5 m, takže šachtová zátka má celkovou tloušťku 4 m. Předpokládá se, že tíha druhé vrstvy betonu o tloušťce 2,5 metru se během konstrukce postará o propojení s první vrstvou.

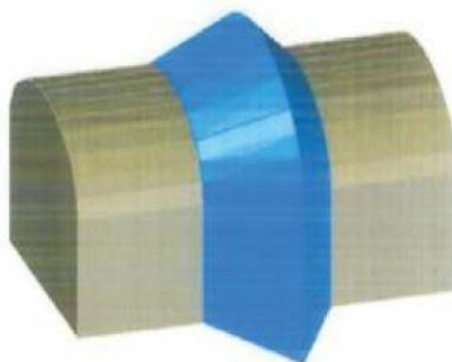
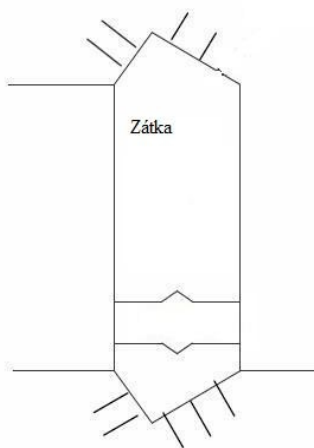
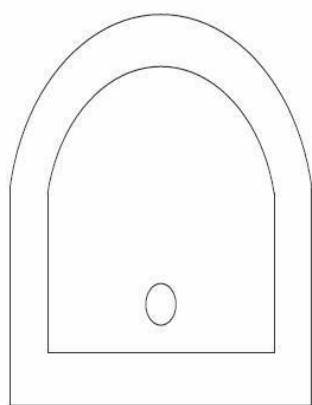
Vyztužení zátky se propočítávalo s ohledem na konečné zatížení působící na betonovou zátku a s celkovou tloušťkou zátky. Zátěžová výztuž je určena rozdělením tahových a tlakových sil na celou tloušťku zátky. Většina výztuže je omezena kolem obvodu povrchu zátky v důsledku koncentrace takových sil. Nicméně minimální kompresní výztuž je také poskytována podél středních vrstev, aby působila proti velkým tlakovým silám.

Injektáž betonové zátky a okolní horniny pro utěsnění se prováděla ve dvou fázích. V první fázi byla použita směs portlandského cementu s maximálním tlakem injektáže 15MPa. Ve druhé fázi bylo k úplnému utěsnění použito směsi mikrocementů a maximální tlak 5MPa. [2]





Obrázek 17: Betonová zátka použitá pro uzavření šachty ropné kaverny[2]



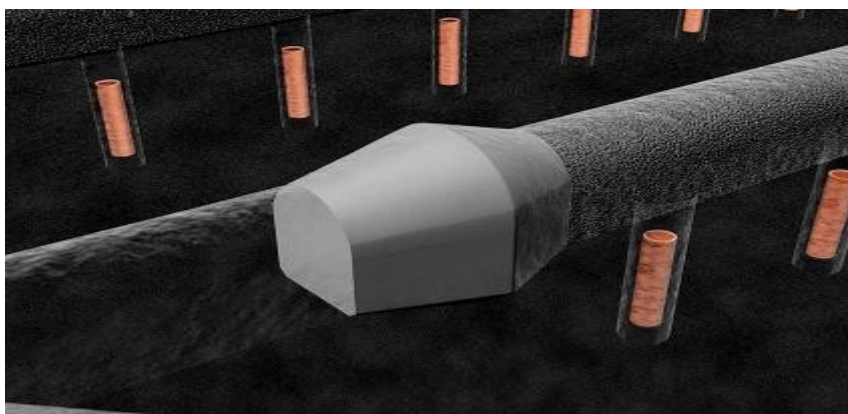
Obrázek 18: Betonová tunelová zátka ropné kaverny [2]

## 8. Podzemní zásobník ve Finsku

Jaderní energetika a ukládání vyhořelého uranového paliva je současné době hodně diskutované téma. O vytvoření trvalých hlubinných úložišť pro jaderný odpad uvažuje Švédsko, Německo i USA. Finsko stavbu svého prvního úložiště již zahájilo a v provozu má být do roku 2023. [5]

### 8.1 Popis projektu

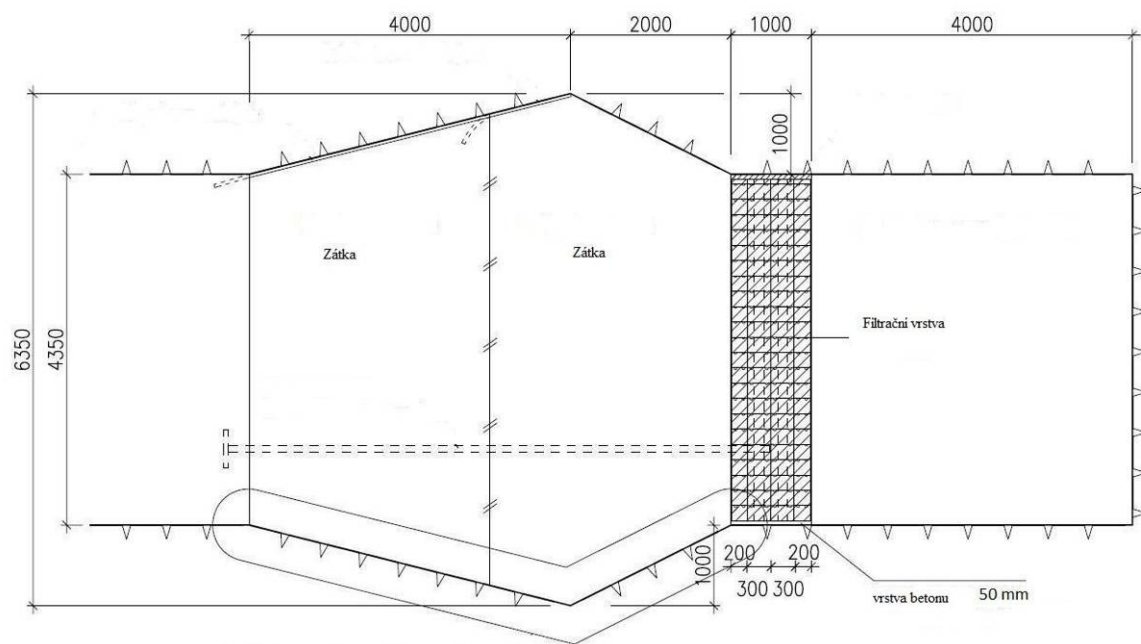
Úložiště v Olkiluotu ve Finsku se bude skládat ze sítě tunelů v hloubce 400 – 450 metrů pod povrchem. Zařízení bude schopno pojmout a trvale uskladnit až 6500 tun vyhořelého uranového paliva. Vyhořelé uranové palivo je stlačeno do malých pelet a ty jsou pak uloženy do tyčí ze zirkonia. Tyče jsou umístěny do litinových nádob a tak pak ještě do měděné nádoby. Takto uložený odpad bude převezen do úložiště a umístí se do vrtu ve skalním podloží. Vrt je vyztužen bentonitovými bloky a uzavřen. Poté dojde k zaplnění přístupového tunelu jílovitými bloky, které udrží bentonitové pouzdro na místě a zabrání průtoku podzemní vody. Následně bude tunel uzavřen betonovou zátkou (Obrázek 19) a utěsněn injektáží. [5]



Obrázek 19: Model uzavření tunelu a uložení jaderného odpadu[6]

### 8.2 Betonová zátka

Tunelová betonová zátka je železobetonová konstrukce o průměru 4,35 až 6,35 metrů a délce 6 metrů (Obrázek 20). Zátka obsahuje přibližně 150 m<sup>3</sup> betonu a 20 tun ocelových výztuží a odlití zátky se provede ze dvou částí. Pro betonovou zátku byla vyvinuta nová betonová směs s nízkým pH, protože bylo třeba zajistit dlouhodobou stabilitu bentonitu. Následně se provede injektáž okolo betonové zátky pro utěsnění. Doba životnosti je 100 let, ale měla by chránit životní prostředí stovky tisíc let. [5]



Obrázek 20: Návrh betonové zátky [6]

## 9. Závěr

Záměrem této bakalářské práce bylo představit, jak se v České republice a v zahraničí skladuje plyn a jaké druhy podzemních zásobníků jsou k dispozici. Blíže byl rozebrán podzemní zásobník v Hájích u Příbrami, protože je svého druhu zatím jediným v ČR. Tento zásobník byl realizován v prostoru bývalého uranového dolu, uzavření zásobníku se provedlo pomocí tlakové betonové zátky s působením vodní tlakové clony. Vodní tlaková clona a injektážní práce provedené na tomto díle slouží k dokonalému utěsnění podzemního zásobníku.

Byly zde představeny způsoby skladování a podzemních zásobníků v Německu, jelikož Německo má velkou skladovací kapacitu. Německo využívá ke skladování ropy a zemního plynu solných kaveren. Jedním z největších úložišť zemního plynu v Německu je oblast Etzel, zemní plyn se zde skladuje ve zhruba 73 ropných kavernách. Při vytváření solných kaveren bylo využito směrového vrtání.

Jelikož je Norsko jedním z hlavních dodavatelů plynu tak i zde se nachází podzemní zásobníky. Vybrán byl projekt ropné rafinerie Mongstad, kde se nachází skalní kavernový podzemní zásobník pro skladování propanu. Tento projekt, byl vybrán, protože zásobník je uzavřen betonovou zátkou s využitím vodní clony, ale od zásobníku v Hájích se odlišuje tím, že prostředí je udržováno pod teplotou – 42°C pomocí chladicího zařízení.

Podzemní zásobníky ve skalním masivu uzavřené betonovou zátkou se využívají v zahraničí nejen ke skladování plynu, ale i ke skladování ropy nebo jako úložiště jaderného odpadu. Pro každý projekt je navrhována betonová zátka přesně na potřebné parametry. Podzemní zásobník pro uskladnění ropy v Indii je také uzavřen betonovou zátkou a utěsněn vodní tlakovou clonou. Pro tento projekt bylo nutné vytvořit speciální betonovou směs, která byla použita pro betonáž zátky, protože betonová zátka je v přímém kontaktu s ropou. A proto bylo nutné vytvořit směs, která by byla odolná vůči působení síry. Zátky byly odlity z portlandského cementu M40. Betonová zátka využita k uzavření jednoho z tunelů jaderného úložiště ve Finsku, byla konstruována tak, aby byla odolná a zajistila dlouhodobou životnost bentonitových směsí použitých při uskladnění jaderného odpadu. Proto musela být vytvořena betonová směs, která má nízké pH.

Využití podzemních prostor je výhodné z ekonomického hlediska, ale také v některých případech i z toho ekologického.

## Seznam použité literatury

- [1]. BUJOK, Petr, Richard BITTNER a Otakar DORDA. *Těžba a vtláčování tekutin*: (vybrané kapitoly). Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 1994.
- [2] Dr. A. NANDA, Dr. R. RATH a Dr. A. USMANI. *Underground Storage Technologies*. Engineers India Ltd., New Delhi. ISBN No. 978-93-5254-383-0. Dostupné z: <http://iaeg.info/media/1249/underground-storage-technologies-an-edited-book-by-eil-1.pdf> [cit.2018-01-16]
- [3].CIGLER Z., ALDORF J., HORÁČEK M. *Těsnění vodního tlakového uzávěru podzemního zásobníku zemního plynu Háje*.Tunel, roč. 8, č. 2/99
- [4] SOLICH M., PROKEŠ O., *Uskladnění zemního plynu a vyrovnání odběrových špiček*. Chem. Listy ročník 2006, č. 100. Dostupné z internetu: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2006\\_s1\\_s3-s6.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2006_s1_s3-s6.pdf)
- [5].*Geologic disposal of spent nuclear fuel in Olkituoto*. Dostupné z internetu: <http://www.posiva.fi/files/4545/Kaytetyn-ydinpolttoaineen-loppusijoitus-EN-LORES.pdf> [cit.2018-04-27]
- [6].*Low-pH Concrete Developed For Tunnel End Plugs Used In Nuclear Waste Containment*. Dostupné z internetu: [http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/OA-Low-pH\\_concrete\\_developed.pdf](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/OA-Low-pH_concrete_developed.pdf) [cit.2018-04-27]
- [7].*Plynaři jsou na případnou krizi připraveni*. Dostupné z internetu: <http://www.petrolmedia.cz/aktuality/plynari-jsou-na-pripadnou-krizi-na-ukrajine-pripraveni-3825.aspx?nom=4725&vote=3> [cit.2018-03-16]
- [8]. JANČAR R. *Podívejte se jak se v Česku skladuje plyn, který se nám teď hodí*. Dostupné z internetu: [https://technet.idnes.cz/podivejte-se-jak-se-v-cesku-skladuje-plyn-ktery-se-nam-ted-hodi-p6c-/tec\\_tecnika.aspx?c=A090108\\_200359\\_tec\\_tecnika\\_rja](https://technet.idnes.cz/podivejte-se-jak-se-v-cesku-skladuje-plyn-ktery-se-nam-ted-hodi-p6c-/tec_tecnika.aspx?c=A090108_200359_tec_tecnika_rja)
- [9].*Podzemní zásobníky plynu – role v rámci plynárenské soustavy ČR a legislativní rámec jejich provozování*. Dostupné z internetu: [www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/110.pptx](http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/110.pptx)
- [10].*PZP Háje u Příbrami*. Dostupné z internetu: <https://www.innogy-gasstorage.cz/cs/haje/> [cit.2018-01-16]
- [11].*Salzstock Etzel* . Dostupné z internetu: <http://www.ekb-storage.de/en/the-ekb/the-etzel-cavern-storage-facility/> [cit.2018-01-16]
- [12].*Underground constructions for the norwegian oil and gas industry*. Dostupné z internetu: [http://tunnel.no/wp-content/uploads/2014/01/Publication\\_16.pdf](http://tunnel.no/wp-content/uploads/2014/01/Publication_16.pdf) [cit.2018-01-16]
- [13].*Underground Storage in Germany*. Dostupné z internetu: <http://sp.lyellcollection.org/content/313/1/93/tab-figures-data> [cit.2018-01-16]

- [14]. *Vestprosses propane cavern project, Norway*. Dostupné z internetu: [http://www.stabinor.no/Brosjyre/Cavern\\_Project.pdf](http://www.stabinor.no/Brosjyre/Cavern_Project.pdf) [cit.2018-01-16]
- [15]. *Zásobník plynu háje/Gas Tank Haje Near Pribram*. Dostupné z internetu: <http://atana.unas.cz/zasobnik-plynu-haje-u-pribrami-gas-tank-haje-near-pribram/> [cit.2018-04-27]
- [16]. <https://innogy-gasstorage-nwe.com/web/cms/en/3267954/innogy-gas-storage-nwe/about-us/our-storages/> [cit.2018-04-27]
- [17]. [www.oenergetice.cz](http://www.oenergetice.cz) [cit.2017-21-16]
- [18]. [www.enviweb.cz/](http://www.enviweb.cz/) [cit.2018-21-16]
- [19]. <https://www.energy-pedia.com/news/united-kingdom/star-energys-humbly-grove-gas-storage-facility-at-risk-from-tax-rise> [cit.2018-04-27]
- [20]. <http://www.ficcio.net/reservoir-engineer/> [cit.2018-01-17]
- [21]. [http://www.aglresources.com/about/jish\\_qa.aspx](http://www.aglresources.com/about/jish_qa.aspx) [cit.2018-04-02]
- [22]. <http://www.ceskaplynarenska.cz/cs/skladovani> [cit.2018-03-07]

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Zásobník ve vytěženém ložisku ropy nebo zemního plynu [19] .....	12
Obrázek 2: Aquiferový podzemní zásobník[20] .....	13
Obrázek 3: Schéma procesu vytváření solné kaverny[21] .....	14
Obrázek 4: Opuštěný důlní prostor použitý pro vytvoření kavernového zásobníku[8] .....	15
Obrázek 5: Mapa podzemních zásobníků v ČR [7] .....	17
Obrázek 6: Schéma podzemního zásobníku Háje u Příbrami [15] .....	19
Obrázek 7: Provedení těsnící injektáže tlakových zátek[3] .....	21
Obrázek 8: Mapa podzemních zásobníků v Německu [11] .....	24
Obrázek 9: Způsob vrtání solných kaveren – využití směrové vrtání [11] .....	27
Obrázek 10: Průřez kompletně vyztuženým vrtem solné kaverny[11] .....	28
Obrázek 11: Ražba propanové kaverny[14] .....	31
Obrázek 12: Mrazicí proces stěn propanové kaverny[14] .....	33
Obrázek 13: Mrazicí zařízení [14] .....	33
Obrázek 14: Jedna z kavernových šachet [14] .....	35
Obrázek 15: Pohled na dokončenou betonovou zátku [14] .....	36
Obrázek 16: Schéma komplexu ropných kaveren v Padure[2] .....	38
Obrázek 17: Betonová zátka použitá pro uzavření šachty ropné kaverny[2] .....	41
Obrázek 18: Betonová tunelová zátka ropné kaverny [2] .....	41
Obrázek 19: Model uzavření tunelu a uložení jaderného odpadu[6] .....	42
Obrázek 20: Návrh betonové zátky [6] .....	43

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1: Přehled podzemních zásobníků v ČR, uskladňovací kapacita a provozovatel ..... 16